

УДК 549.5:54–165:536.21:536.413:537.31/32

**Л. А. Башкиров**, доктор химических наук, профессор (БГТУ); **А. К. Болвако**, ассистент (БГТУ);  
**Г. П. Дудчик**, кандидат химических наук, доцент, заведующая кафедрой (БГТУ);  
**Л. Я. Крисько**, кандидат химических наук, доцент (БГТУ)

### СИНТЕЗ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ МЕТОДОМ ТВЕРДОФАЗНЫХ РЕАКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕКУРСОРОВ $\text{BiFeO}_3$ И $\text{PrCoO}_3$

Методом твердофазных реакций были впервые синтезированы твердые растворы системы  $\text{BiFeO}_3 - \text{PrCoO}_3$  с использованием прекурсоров – феррита висмута  $\text{BiFeO}_3$  и кобальтита празеодима  $\text{PrCoO}_3$ . Установлены температурные и временные режимы синтеза прекурсоров и твердых растворов. Определены параметры кристаллической решетки твердых растворов состава  $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$  ( $x = 0; 0,2; 0,5; 1$ ). Предложены возможные механизмы образования твердых растворов из прекурсоров.

Solid solutions of  $\text{BiFeO}_3 - \text{PrCoO}_3$  system were synthesized by means of the solid-state reactions method using precursors – bismuth ferrite  $\text{BiFeO}_3$  and praseodymium cobaltite  $\text{PrCoO}_3$ . The temperature-time syntheses regimes of the precursors and the solid solutions were selected. The crystal lattices parameters of the solid solutions with compositions  $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$  ( $x = 0; 0.2; 0.5; 1$ ) were found. The possible mechanisms of formation of the solid solutions from the precursors were proposed.

**Введение.** Как известно, ряд кристаллических диэлектриков обладают самопроизвольной поляризацией (электрическим упорядочением) в небольших объемах вещества, линейные размеры которых не превышают  $10^{-6}$  м. Во внешнем электрическом поле подобные вещества, названные сегнетоэлектриками, или ферроэлектриками (ФЭ), обнаруживают аномально высокую поляризацию, которая в  $10^4$ – $10^5$  раз превышает поляризацию обычных диэлектриков.

Магнитными аналогами ФЭ являются ферромагнетики (ФМ) – материалы со спонтанной намагниченностью (магнитным упорядочением) в тех же по размерам объемах вещества, которые во внешнем магнитном поле намагничиваются в  $10^{10}$ – $10^{11}$  раз сильнее диа- и парамагнетиков. Способность ФЭ поляризоваться в электрическом и ФМ намагничиваться в магнитном поле успешно используется в различных технических устройствах (в микроэлектронике, электрооптике, в системах магнитной записи и воспроизведения звука и др.). Однако потребности современной техники в создании устройств на основе материалов нового поколения, которые сочетали бы в себе возможности магнитной записи, хранения и быстросействующей и эффективной обработки информации, явились одной из причин интенсивного исследования веществ, обладающих способностью откликаться одновременно на воздействие электрического и магнитного полей. В таких веществах, названных мультиферроиками, или сегнетомагнетиками (СМ), имеет место магнитоэлектрический эффект (МЭ-эффект) – возникновение намагниченности  $M$  под действием электрического поля с напряженностью  $E$  и возникновение электри-

ческой поляризации  $P$  под действием магнитного поля с напряженностью  $H$  [1]:  $M = \alpha E$  и  $P = \alpha H$ . Другими словами, для каждого СМ существует однозначная связь между  $E$  и  $H$ , которую можно выразить производной  $dE / dH$ . Величина этой производной принята в качестве количественной характеристики наблюдаемого МЭ-эффекта. Особого внимания заслуживает тот факт, что данный эффект возникает при воздействии на СМ статического электрического поля с постоянной напряженностью, что исключает тепловые (энергетические) потери, неизбежные при прохождении электрического тока через вещество.

Таким образом, управляя магнитными свойствами вещества с помощью электрического поля (или наоборот, электрическими свойствами – магнитным полем), можно создавать устройства записи или считывания информации путем преобразования магнитного упорядочения или разупорядочения в электрический сигнал.

Наиболее перспективным СМ, способным найти широкое применение в различных электронных устройствах нового поколения, является феррит висмута  $\text{BiFeO}_3$ . Данное соединение – одно из немногих веществ, которые сочетают электрическое и магнитное упорядочение при рекордно высоких температурах. Для него сегнетоэлектрическая температура Кюри ( $T_C$ ) равна 1083 К, температура перехода из антиферромагнитного в парамагнитное состояние ( $T_N$ ) – 643 К [1]. При комнатных температурах в тонких (50–500 нм) пленках  $\text{BiFeO}_3$  зафиксированы значения МЭ-эффекта  $dE / dH = 3 \text{ В}/(\text{см} \cdot \text{Э})$ , что на порядки превышает величины, измеренные при комнатных температурах в других СМ [2].

**Температурно-временные режимы спекания образцов и параметры элементарной ячейки твердых растворов и прекурсоров  $\text{BiFeO}_3$  и  $\text{PrCoO}_3$**

Состав	Температура спекания, °С	Время спекания, ч	$a$ , нм	$b$ , нм	$c$ , нм	Объем элементарной ячейки $V \cdot 10^3$ , нм <sup>3</sup>	Угол $\alpha$ , град
$\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ $x = 0,5$	770	4	0,3974	0,3910	0,4038	62,75	–
	800	2	0,3881	0,3877	0,3798	57,14	–
	800	14	0,3869	0,3868	0,3826	57,27	–
	830	4	0,3863	0,3866	0,3805	56,83	–
	850	14	0,3873	0,3864	0,3879	58,06	–
$\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ $x = 0,2$	770	4	0,3944	–	–	61,34	89,19
	800	2	0,3909	–	–	59,64	88,19
	800	14	0,3902	–	–	59,39	89,39
	830	4	0,3898	–	–	59,23	89,37
$\text{PrCoO}_3$	1200	1	0,3783	0,3795	0,3779	54,39	–
$\text{BiFeO}_3$	800	8	0,3963	–	–	62,23	89,23

Проблема, однако, заключается в том, что у объемных образцов феррита висмута линейный МЭ-эффект практически не наблюдается вследствие наличия пространственно-модулированной спиновой структуры – несоразмерности его антиферромагнитной и кристаллической структур, приводящей к тому, что в среднем по объему МЭ-эффект и спонтанная намагниченность равны нулю [3].

Многочисленные исследования феррита висмута показали, что перспективным путем подавления пространственно-модулированной структуры и улучшения его магнитоэлектрических свойств, помимо приложения сильных магнитных полей и механических напряжений, является направленным синтез твердых растворов на основе  $\text{BiFeO}_3$ , т. е. частичное замещение ионов висмута ионами других металлов [4]. Твердые растворы на основе феррита висмута можно разбить на две основные группы: с замещением ионов висмута и с замещением ионов железа. Как правило, в первом случае используются ионы редкоземельных элементов [3]. Замещение ионов железа проводят ионами переходных металлов с близкими ионными радиусами (ионы  $\text{Ti}^{4+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ). Введение в феррит висмута примесей других элементов, являясь аналогом механического давления на кристаллическую решетку, делает существование пространственно-модулированной структуры энергетически невыгодным и позволяет получить величины МЭ-эффекта, на порядок превосходящие наблюдаемые ранее [4].

На кафедре физической и коллоидной химии эта идея получила дальнейшее развитие – в течение ряда лет проводятся систематические исследования закономерностей влияния одновременного изовалентного замещения ионов  $\text{Bi}^{3+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  в  $\text{BiFeO}_3$  парами ионов:  $\text{La}^{3+}$  и  $\text{Co}^{3+}$ ;  $\text{Pr}^{3+}$  и  $\text{Co}^{3+}$ ;  $\text{La}^{3+}$  и  $\text{Ga}^{3+}$  и др. на кристалличе-

скую структуру и электромагнитные свойства образующихся при этом твердых растворов.

Впервые синтезированы различными методами с использованием различных исходных веществ твердые растворы  $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$  [5],  $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$  [6] и ряд других и изучены их свойства. В литературе сведения по данному направлению отсутствуют.

В работе изучались возможности синтеза поликристаллических образцов твердых растворов  $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$  керамическим методом с использованием в качестве прекурсоров феррита висмута  $\text{BiFeO}_3$  и кобальтита празеодима  $\text{PrCoO}_3$ .

**Методика эксперимента.** Для синтеза поликристаллических образцов прекурсоров – феррита висмута  $\text{BiFeO}_3$  и кобальтита празеодима  $\text{PrCoO}_3$  керамическим методом использовались оксиды висмута  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (х.ч.), железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (ч.д.а.), празеодима  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  (х.ч.) и кобальта  $\text{Co}_3\text{O}_4$  (ч.д.а.). Порошки исходных оксидов, взятые в молярных соотношениях, соответствующих составам  $\text{BiFeO}_3$  и  $\text{PrCoO}_3$ , смешивали с добавлением этанола и мололи в планетарной мельнице Pulverizette 6.0 в течение 30 мин. Полученную шихту с внесенным этанолом прессовали под давлением 50–75 МПа в таблетки диаметром 25 мм и высотой 5–7 мм. Синтез феррита висмута осуществлялся путем изотермического отжига таблеток на воздухе при 800°C на протяжении 8 ч, синтез кобальтита празеодима – при 1200°C в течение 1 ч (таблица). Охлаждение образцов от температуры спекания до комнатной проводилось медленно, со скоростью примерно 2–3 град/мин. Для предотвращения взаимодействия таблеток с материалом подложки ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) на поверхность подложки наносился буферный слой шихты соответствующего состава.

Для синтеза поликристаллических образцов твердых растворов  $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$  таблетки прекурсоров дробились, растирались в агатовой ступке и мололись в планетарной мельнице, после чего полученные порошки в нужных молярных соотношениях смешивались, мололись с добавлением этанола и прессовались в таблетки диаметром 8 мм и высотой 4–5 мм. Полученные образцы подвергались спеканию при температуре от 770 до 850°C, время спекания варьировалось от 2 до 14 ч (таблица).

Идентификация образцов прекурсоров и твердых растворов проводилась путем рентгенофазового анализа (РФА). Дифрактограммы получали на рентгеновском дифрактометре D8 Advance Bruker AXS (Германия) в диапазоне углов  $2\Theta$  20–80° с использованием  $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Определение параметров кристаллической решетки проводилось при помощи рентгеноструктурного табличного процессора RTP и данных картотеки международного центра дифракционных данных (ICDD JCPDS).

**Результаты и их обсуждение.** Дифрактограммы поликристаллических образцов прекурсоров представлены на рис. 1 и 2.

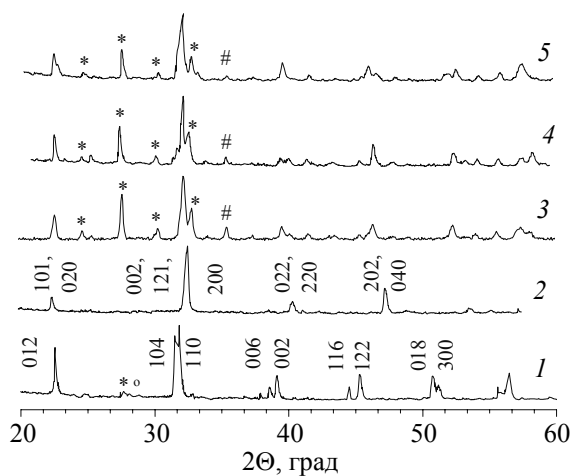


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы поликристаллических образцов прекурсоров  $\text{BiFeO}_3$  (1),  $\text{PrCoO}_3$  (2), твердого раствора  $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$  ( $x = 0,2$ ), полученного в работе [6] из оксидов (3) и полученного нами из прекурсоров при  $T = 800^\circ\text{C}$ , 2 ч (4) и  $T = 770^\circ\text{C}$ , 4 ч (5).  
\* –  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$ ; o –  $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ ; # –  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$

Анализ дифрактограмм показал, что в пределах погрешности метода РФА полученные образцы  $\text{PrCoO}_3$  являются однофазными и не содержат примесей не прореагировавших оксидов (рис. 1, дифрактограмма 2).

На дифрактограмме  $\text{BiFeO}_3$  (рис. 1, дифрактограмма 1) наблюдались небольшие рефлексы примесных фаз – парамагнитного силленита  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$  и антиферромагнитного муллита

$\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ . Дифрактограммы  $\text{BiFeO}_3$  и  $\text{PrCoO}_3$  хорошо согласуются с дифрактограммами, полученными для этих соединений в работе [6] и с литературными данными [7], в соответствии с которыми методом твердофазных реакций однофазные образцы  $\text{BiFeO}_3$  получить практически невозможно.

На рис. 1 представлены также дифрактограммы поликристаллических образцов твердого раствора  $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$  ( $x = 0,2$ ), синтезированного при различных температурах и временах спекания (дифрактограммы 4, 5). На рис. 2 показаны дифрактограммы поликристаллических образцов твердого раствора  $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$  ( $x = 0,5$ ). Для сравнения на рис. 1 и 2 даны также дифрактограммы твердых растворов аналогичных составов, полученных в работе [6] путем спекания соответствующих оксидов (дифрактограммы 3).

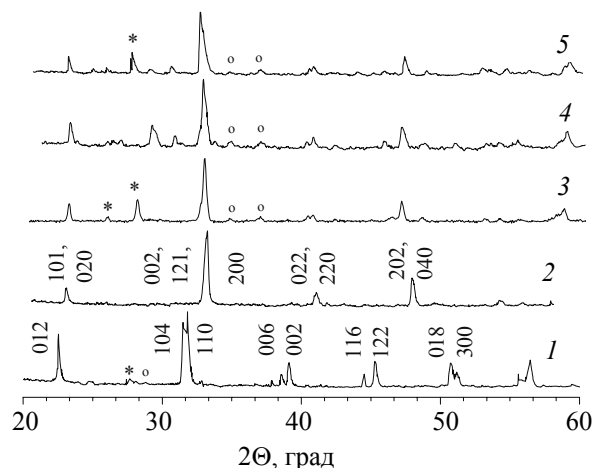


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы поликристаллических образцов прекурсоров  $\text{BiFeO}_3$  (1),  $\text{PrCoO}_3$  (2), твердого раствора  $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$  ( $x = 0,5$ ), полученного в работе [6] из оксидов (3) и полученного нами из прекурсоров при  $T = 800^\circ\text{C}$ , 2 ч (4) и  $T = 830^\circ\text{C}$ , 4 ч (5).  
\* –  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$ ; o –  $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$

Спекание смеси порошков прекурсоров в молярном соотношении  $\text{BiFeO}_3 : \text{PrCoO}_3 = 4 : 1$  для получения твердого раствора состава  $\text{Bi}_{0,8}\text{Pr}_{0,2}\text{Fe}_{0,8}\text{Co}_{0,2}\text{O}_3$  ( $x = 0,2$ ), обогащенного висмутом, проводили при четырех температурно-временных режимах, указанных в таблице. С учетом относительно низкой, по сравнению с  $\text{PrCoO}_3$ , температуры плавления  $\text{BiFeO}_3$  (1600°C для  $\text{PrCoO}_3$  и 950°C для  $\text{BiFeO}_3$  [8]) температура спекания не превышала 830°C.

Анализ дифрактограмм показал, что после спекания шихты при  $T = 800^\circ\text{C}$  (2 ч) в конечном продукте  $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$  ( $x = 0,2$ ) присутствует

небольшое количество примесных фаз –  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$  и ферромагнетика  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  (рис. 1, дифрактограмма 4). Увеличение температуры спекания до  $830^\circ\text{C}$  (4 ч) и продолжительности термообработки до 14 ч при  $T = 800^\circ\text{C}$  не привело к образованию беспримесного продукта. Таким образом, можно сделать вывод о термической неустойчивости твердого раствора  $\text{Bi}_{0,8}\text{Pr}_{0,2}\text{Fe}_{0,8}\text{Co}_{0,2}\text{O}_3$  и сложном механизме протекания исследуемой твердофазной реакции при  $T > 800^\circ\text{C}$ . Понижение температуры до  $T = 770^\circ\text{C}$  при времени отжига 4 ч вызвало существенное уменьшение содержания примесей в образце, в особенности примеси ферромагнетика  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ , негативно влияющего на свойства целевого продукта. Из рис. 1 (дифрактограмма 5) видно, что содержание этой примеси пренебрежимо мало.

Спекание смеси порошков прекурсоров в молярном соотношении  $\text{BiFeO}_3 : \text{PrCoO}_3 = 1 : 1$  для получения твердого раствора состава  $\text{Bi}_{0,5}\text{Pr}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$  ( $x = 0,5$ ) проводили при пяти температурно-временных режимах, указанных в таблице. Максимальная температура спекания шихты, с учетом пониженного содержания феррита висмута по сравнению с предыдущим составом, составила  $850^\circ\text{C}$ . Образцы, полученные при  $T = 770^\circ\text{C}$  (4 ч) и  $T = 800^\circ\text{C}$  (2 ч), содержали небольшое количество антиферромагнетика  $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ . Повышение температуры отжига до  $830^\circ\text{C}$  (4 ч) и  $850^\circ\text{C}$  (14 ч) приводит к практическому исчезновению этой примесной фазы, однако на дифрактограмме появляется небольшой рефлекс, соответствующий парамагнетику  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$ . Следов ферромагнитной фазы  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  ни в одном из этих образцов не обнаружено (рис. 2). Наиболее оптимальным режимом синтеза твердого раствора состава  $\text{Bi}_{0,5}\text{Pr}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$  следует, очевидно, выбрать  $T = 830^\circ\text{C}$  (4 ч).

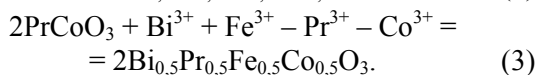
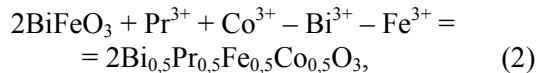
Сопоставление полученных результатов с данными работы [6] показывает (рис. 1 и 2), что синтез твердых растворов  $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$  из прекурсоров  $\text{BiFeO}_3$  и  $\text{PrCoO}_3$  является более перспективным методом, поскольку дает возможность получения продукта, содержащего незначительное количество примесных фаз по сравнению с образцами, полученными непосредственно из оксидов металлов. Кроме того, синтез из прекурсоров позволяет снизить температуру спекания с  $1000\text{--}1200$  [6] до  $800\text{--}850^\circ\text{C}$  и продолжительность термообработки.

Образование твердых растворов протекает, очевидно, путем диффузии ионов на границе раздела фаз  $\text{BiFeO}_3$  и  $\text{PrCoO}_3$ . Можно предположить два возможных механизма диффузии – двухстороннюю (рис. 3) и одностороннюю (рис. 4) диффузию. На примере образования

двух формульных единиц твердого раствора состава  $\text{Bi}_{0,5}\text{Pr}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$  по уравнению



схему двухсторонней диффузии можно отобразить следующими уравнениями:



Сложением уравнений (2) и (3) получаем суммарное уравнение (1). Стрелками показано направление движения ионов из одной кристаллической решетки в другую, пунктирной линией ограничена область зарождения новой фазы – твердого раствора  $\text{Bi}_{0,5}\text{Pr}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$  (рис. 3 и 4).

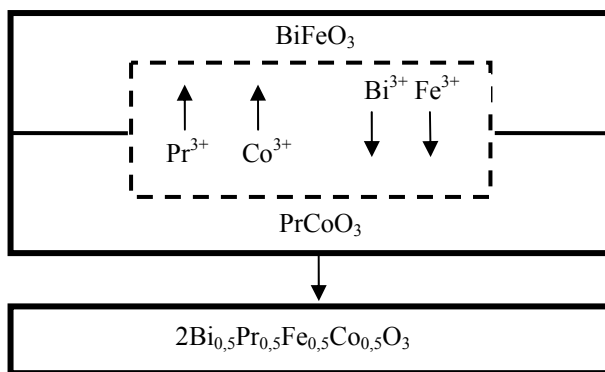


Рис. 3. Схема двухсторонней диффузии ионов  $\text{Bi}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Co}^{3+}$  при образовании двух формульных единиц твердого раствора  $\text{Bi}_{0,5}\text{Pr}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$  из прекурсоров  $\text{BiFeO}_3$  и  $\text{PrCoO}_3$

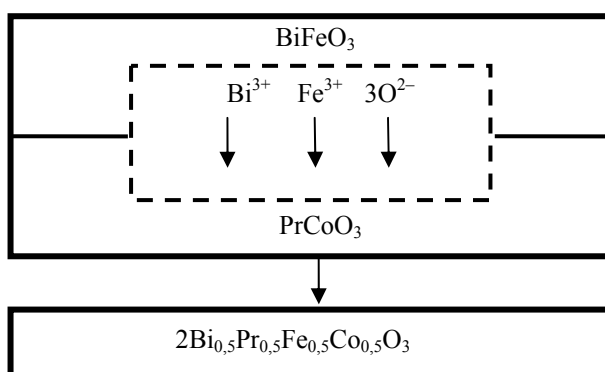
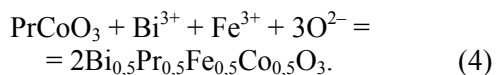


Рис. 4. Схема односторонней диффузии ионов  $\text{Bi}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{O}^{2-}$  из кристаллической решетки прекурсора  $\text{BiFeO}_3$  в решетку прекурсора  $\text{PrCoO}_3$  при образовании двух формульных единиц твердого раствора  $\text{Bi}_{0,5}\text{Pr}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$

Поскольку температура плавления  $\text{BiFeO}_3$  намного ниже температуры плавления  $\text{PrCoO}_3$ , можно предположить, что из-за более высокой

подвижности ионов кристаллической решетки феррита висмута по сравнению с подвижностью ионов  $\text{Pr}^{3+}$  и  $\text{Co}^{3+}$  возможна односторонняя диффузия  $\text{Bi}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{O}^{2-}$  из кристаллической решетки  $\text{BiFeO}_3$  в кристаллическую решетку  $\text{PrCoO}_3$  по схеме, отображенной на рис. 4.

Схеме, представленной на рис. 4, соответствует материальный баланс ионов, согласно уравнению



Феррит висмута  $\text{BiFeO}_3$  имеет ромбоэдрическую, а кобальтит празеодима – орторомбическую структуру перовскита соответственно [1, 4]. Дифрактограммы образцов твердого раствора состава  $\text{Bi}_{0,8}\text{Pr}_{0,2}\text{Fe}_{0,8}\text{Co}_{0,2}\text{O}_3$ , обогащенного висмутом, показали, что он имеет структуру ромбоэдрически искаженной элементарной перовскитовой ячейки. Рассчитанные нами параметры кристаллической элементарной ячейки прекурсора  $\text{BiFeO}_3$  и твердых растворов приведены в таблице. Наблюдается хорошее совпадение значений параметров элементарной ячейки  $\text{BiFeO}_3$  с данными работы [5]. Для твердого раствора наиболее предпочтительными значениями параметров  $a$  и  $\alpha$  являются те, что соответствуют образцу, полученному спеканием при  $T = 770^\circ\text{C}$  в течение 4 ч (таблица). Как уже отмечалось, этот образец практически не содержит примеси ферромагнетика  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ .

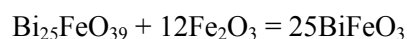
Твердые растворы  $\text{Bi}_{0,5}\text{Pr}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$  с эквимольным содержанием прекурсоров имели орторомбическую кристаллическую структуру. Наиболее надежными значениями параметров элементарной ячейки мы считаем те, которые соответствуют образцу, полученному спеканием прекурсоров при  $T = 830^\circ\text{C}$  на протяжении 4 ч (таблица).

**Заключение.** Методом твердофазных реакций были впервые синтезированы твердые растворы составов  $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$  ( $x = 0; 0,2; 0,5; 1$ ) в двойной системе  $\text{BiFeO}_3 - \text{PrCoO}_3$  с использованием прекурсоров – феррита висмута  $\text{BiFeO}_3$  и кобальтита празеодима  $\text{PrCoO}_3$ . Предварительно прекурсоры получены спеканием соответствующих оксидов. Установлены температурные и временные режимы синтеза прекурсоров и твердых растворов. Определены параметры кристаллической решетки синтезированных твердых растворов.

По сравнению с синтезом твердых растворов состава  $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$  непосредственно из оксидов металлов метод получения их из прекурсоров  $\text{BiFeO}_3$  и  $\text{PrCoO}_3$  является более

перспективным, поскольку конечный продукт содержит незначительное количество примесных фаз. Кроме того, синтез из прекурсоров позволяет существенно снизить температуру спекания исходных образцов.

Дальнейшим развитием разрабатываемого направления – получения перспективных сегнетомагнетиков на основе феррита висмута может быть исследование условий синтеза обогащенного висмутом парамагнитного прекурсора  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$ . Возможно, твердофазное взаимодействие данного прекурсора с оксидом железа по реакции



позволит получить феррит висмута с улучшенными сегнетомагнитными характеристиками.

Работа выполнена в рамках комплексного задания 1.02 ГПНИ «Функциональные материалы и технологии, наноматериалы».

### Литература

1. Макоед, И. И. Получение и физические свойства мультиферроиков: монография / И. И. Макоед. – Брест: БрГУ, 2009. – 181 с.
  2. Epitaxial  $\text{BiFeO}_3$  multiferroic thin film heterostructures / J. Wang [et al.] // Science. – 2003. – Vol. 299. – P. 1719–1722.
  3. Звездин, А. К. Фазовые переходы и гигантский магнитоэлектрический эффект в мультиферроиках / А. К. Звездин, А. П. Пятаков // Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174, № 4. – С. 465–470.
  4. Пятаков, А. П. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики / А. П. Пятаков, А. К. Звездин // Успехи физических наук. – 2012. – Т. 182, № 6. – С. 593–620.
  5. Физико-химические свойства твердых растворов  $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ , синтезированных с использованием различных методов / А. А. Зятюпо [и др.] // Труды БГТУ. – 2012. – № 3: Химия и технология неорган. в-в. – С. 37–41.
  6. Синтез, структура и физико-химические свойства твердых растворов в квазибинарной системе  $\text{BiFeO}_3 - \text{PrCoO}_3$  / А. И. Клындюк [и др.] // Вести Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2012. – № 4. – С. 5–9.
  7. Морозов, М. И. Особенности образования  $\text{BiFeO}_3$  в смеси оксидов висмута и железа (III) / М. И. Морозов, Н. А. Ломанова, В. В. Гусаров // Журнал общей химии. – 2003. – Т. 73, вып. 11. – С. 1772–1776.
  8. Портной, К. И. Кислородные соединения редкоземельных элементов / К. И. Портной, И. И. Тимофеева. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.
- Поступила 02.03.2013